

Análisis térmico por método de elementos finitos en nuevos modelos de piezas cerámicas constructivas

Thermal analysis by finite element method in new models of constructive ceramic pieces

^aMarlyn Stephanny Narváez-Ortega, ^bJorge Sánchez-Molina, ^cJessica Viviana Sánchez-Zúñiga

 ^a Arquitecto, stephannynarvaez@outlook.com, Universidad Francisco de Paula Santander, Cúcuta, Colombia

 ^b Doctor en en Avances en Ingeniería de los Materiales y Energías, Universidad Francisco de Paula Santander, jorgesm@ufps.edu.co, Cúcuta, Colombia.

 ^c Magister en Ingeniería de Materiales, jessicavivianasaz@ufps.edu.co, Universidad Francisco de Paula Santander, Cúcuta, Colombia

Recibido: Julio 20 de 2020 **Aceptado:** Diciembre 22 de 2020

Forma de citar: M.S. Narváez-Ortega, J. Sánchez-Molina, J.V. Sánchez-Zúñiga, "Análisis térmico por método de elementos finitos en nuevos modelos de piezas cerámicas constructivas", *Mundo Fesc*, vol. 11, no. 21, pp. 15-25, 2021

Resumen

Considerando las oportunidades que presenta la porosidad para incrementar la resistencia térmica de materiales cerámicos, este estudio se articula desde el marco del diseño para añadir propiedades térmicamente eficientes a bloques de arcilla cocida en la generación de soluciones constructivas de bajo costo para climas tropicales cálidos. La investigación aplica como aditivo tecnológico residuos de madera añadiendo aserrín al 5% en una matriz de arcilla roja al 95% para fabricar un producto cerámico que presenta a su vez modificaciones en la morfología de los tabiques internos interrumpiendo la conductancia por puente térmico, y evalúa de forma comparativa la influencia del aumento de espesor en la pieza y la adición de paredes internas como técnicas para reducir la transmisión de calor en una unidad constructiva; el objetivo de este desarrollo es perfeccionar el desempeño térmico de un bloque cerámico tipo H10 como uno de los productos más demandado en la construcción de mampostería en la región Norte de Santander, Colombia. La metodología utilizada se divide en dos fases, en una primera etapa se desarrollan simulaciones térmicas en software ANSYS R16 para determinar perfiles de distribución de temperatura y flujo de calor estudiando en un primer análisis un bloque estándar de seis huecos rectangulares en una composición de 100% arcilla y en una segunda situación evaluando una pieza tipo bloque tradicional y tres casos con formas disipadoras de calor en una composición de 5% aserrín y 95% arcilla en las muestras; finalmente, se toman los especímenes que presentan mejor desempeño para ejecutar análisis físico-mecánicos implementando la Norma Técnica Colombiana 4017 que permitan caracterizar la viabilidad técnica del producto. Los resultados muestran la efectividad de las estrategias aplicadas para reducir la transmisión de calor, presentando una oportunidad de desarrollo en las formas disipadoras de los tabiques y en la implementación de sustitutos residuales formadores de poros para productos cerámicos, rescatando características de una pieza tradicional para configurar unidades constructivas más eficientes.

Palabras clave: Cerámica, Porosidad, Bloque, Puente térmico.

Autor para correspondencia:

*Correo electrónico: stephannynarvaezortega@outlook.com



Abstract

Considering the opportunities presented by porosity to increase the thermal resistance of ceramic materials, this study is articulated from the design framework to add thermally efficient properties to fired clay blocks in the generation of low-cost construction solutions for Norte de Santander, Colombia a warm tropical climate. The research uses as a technological additive sawdust to generate porosity to a ceramic product that presents morphological modifications in the internal partitions interrupting the conductance by thermal bridge, and evaluates comparatively the influence of the increase of thickness in the piece and the addition of internal walls as techniques to reduce heat transmission. The methodology is developed from thermal simulations in ANSYS R16 software to determine temperature distribution and heat flow profiles in a traditional block-type piece and three samples with dissipative forms in a composition of 5% sawdust and 95% clay, taking the specimens with the best performance to execute physical-mechanical analyses implementing Colombian Technical Standard 4017. The results present an opportunity for development in the dissipative forms of the partitions and in the implementation of residual pore forming substitutes, rescuing characteristics of a traditional piece to configure more efficient construction units.

Keywords: Red Ceramics, Porosity, Block, Thermal properties, Thermal bridge.

Introducción

En la ciudad de Cúcuta, Colombia, con un clima cálido subhúmedo donde las temperaturas promedio fluctúan entre los 29°C y los 33°C [1] es imperativo el desarrollo de soluciones constructivas que respondan eficientemente a condiciones climáticas de alta radiación solar, en este sentido, la envolvente arquitectónica es uno de los principales objetivos de desarrollo al ser la encargada de los intercambios energéticos entre el exterior y el interior de las edificaciones. En Norte de Santander el bloque cerámico H10 de seis huecos rectangulares y 100mm de espesor representa más del 50% de la mampostería construida de la región, por tanto, su rendimiento térmico es objeto de estudio en esta investigación, cuestionando sus características tradicionales para introducir técnicas de resistencia térmica como oportunidades de optimizar la envolvente cerámica con funciones capaces de mitigar las condiciones climáticas adversas del contexto. Esta investigación estudia el comportamiento térmico, físico y mecánico de estrategias como la porosidad, el espesor de la pieza y la forma de los tabiques internos en relación a la eficiencia de una unidad constructiva tipo bloque como el producto de más bajo costo y mejor posicionamiento en el mercado cerámico local [2].

Desde esta perspectiva, diversos investigadores han explorado la influencia que ejerce la porosidad en el comportamiento térmico de cerámicos, utilizando aditivos residuales industriales y agroindustriales con capacidad de incinerarse a altas temperaturas de cocción durante el proceso de fabricación formando poros en el cuerpo de las piezas cerámicas que mejoran sus propiedades de conductividad y conservan sus propiedades mecánicas [3]. Dentro de este nicho de investigación algunos autores han implementado residuos de madera en la fabricación de cerámicos, evaluando ladrillos con adición de aserrín al 2.5%, 5% y 10% en bases de arcilla fabricados a altas temperaturas de cocción de hasta 1100°C donde la porosidad de la membrana aumenta, comprobando que el aserrín es un gran sustituto que no solo proporciona una alta porosidad, sino que presenta buena morfología, resistencia mecánica y estabilidad química al no cambiar la mineralogía de los productos [4][5], resultando en ladrillos más ligeros con ventajas significativas como mejores aislantes térmicos.

Otros estudios han observado que la naturaleza fibrosa de los residuos no crea problemas de extrusión durante el proceso de fabricación, sin embargo, una mayor

adición de este aditivo requiere un mayor contenido de agua para garantizar la plasticidad correcta [6]; en el desarrollo de producto también se considera que las variables hacen más susceptible el cerámico al deterioro por tanto es necesario cuidar las proporciones del aditivo en la mezcla. En general, el aserrín ha probado que puede ser utilizado de una manera ambientalmente segura como agente orgánico formador de poros en arcillas cerámicas.

Basados en investigaciones de diversos autores [7,8] como estrategias adicionales para inhibir la transferencia de calor, en estudios previos hemos evaluado la posibilidad de reducir la conductancia térmica en bloques de arcilla cocida considerando como técnica el aumento de espesor de la pieza cerámica, analizando comparativamente los patrones de distribución de temperatura y flujo de calor en 100mm respecto a 150mm de ancho en sistemas de mampostería homogéneos [9,10] percibiendo una reducción de 0,709°C en la temperatura final transferida implementando 50mm adicionales en las unidades constructivas.

Así mismo, en investigaciones complementarias se ha estudiado el comportamiento térmico de los tabiques en productos tipo bloque H-10 estándar, trabajando sobre su morfología para evitar que funcionen como puentes térmicos directos [11][12][13] cuyos resultados han logrado disminuir la energía transferida 0,981°C en promedio, modificando la geometría de las paredes internas de la pieza de tabiques horizontales a tabiques oblicuos, evitando así recorridos continuos en el proceso de conductancia térmica, la denominada Forma C derivada de este proceso de diseño se puede observar en la Figura 1. Trabajando con la Forma C y considerando nutrientes tecnológicos que aportan porosidad en cerámicos, como antecedente hemos evaluado prototipos a nivel de laboratorio de dos tipos

de mezcla: arcilla al 100% denominada M-A, y variaciones en la matriz de arcilla a través de aditivos termoaislantes como el cisco de café en una mezcla denominada M-ACC con 95% arcilla y 5% polvo de cisco de café, consiguiendo una temperatura transferida de 34,505°C para M-A y 34,272°C en una pasta con M-AC, una reducción de 0,995°C y 1,549°C respectivamente en relación a un bloque H-10 tradicional con 100% arcilla que presenta un temperatura transferida final de 35,821°C [14].

Por tanto, la presente investigación se plantea ¿Cómo otorgar mejores propiedades térmicas a productos tipo bloque cerámico?, con esta premisa busca optimizar el desempeño térmico de los cerámicos mediante una simbiosis entre la interrupción de puentes térmicos en la estructura de los tabiques utilizando una geometría que denominaremos Forma C, el aumento en el espesor de las piezas de 100mm a 150mm con tres variaciones en el número de cavidades internas, así como, la implementación de porosidad en el cuerpo de la cerámica utilizando como aditivo orgánico polvo de aserrín al 5% en una mezcla con 95% arcilla, cuyo objetivo es evaluar el potencial individual y colectivo de las estrategias para añadir atributos térmicamente eficientes a bloques para mampostería constructiva en climas tropicales cálidos subhúmedos como el de la ciudad de Cúcuta, Colombia.

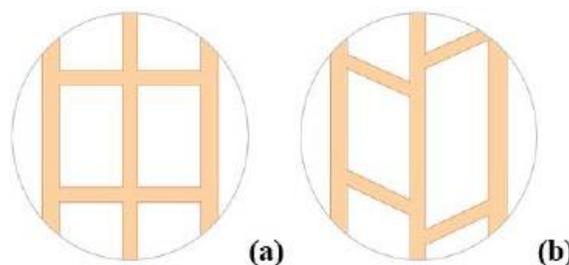


Figura 1. (a) Forma H y (b) Forma C.

Materiales y métodos

El estudio presenta una sinergia entre dos

métodos: en la primera fase se utiliza método de elementos finitos FEM para analizar de forma comparativa el desempeño térmico de cinco piezas constructivas considerando en una primera situación un bloque H-10 estándar compuesto por una mezcla de 100% arcilla roja denominada M-A como punto de referencia para la evaluación de la efectividad de las estrategias al cual nos referiremos como H1, y en una segunda situación la comparación con una muestra con forma tradicional H2 y tres piezas con formas disipadoras denominadas C1 de 100mm de espesor y 6 huecos horizontales, C2 en un ancho de 150mm con 9 huecos horizontales y C3 una pieza con 150mm de espesor que considerando 12 huecos horizontales con una composición de 5% aserrín y 95% arcilla en las muestras, la descripción se relaciona en la Tabla 1, la matriz de análisis se relaciona en la Figura 2 como modelos para la toma de decisiones de diseño.

Tabla 1. Muestras.

Producto	Forma	Mezcla	Espesor	Cavidades
H1	Forma H	M-A	100mm	6 cavidades
H2	Forma H	M-ASS	100mm	6 cavidades
C1	Forma C	M-ASS	100mm	6 cavidades
C2	Forma C	M-ASS	150mm	9 cavidades
C3	Forma C	M-ASS	150mm	12 cavidades

En la segunda fase se selecciona los productos con mayor viabilidad y mejor desempeño térmico para aplicar la Norma técnica Colombiana NTC 4017 [15] en el laboratorio del Centro de Investigación de Materiales Cerámicos CIMAC con el objetivo de caracterizar las propiedades físicas y mecánicas a nivel de probetas fabricadas a escala 1:6 por extrusión, a través de análisis físicos cerámicos por extruido AFE, determinación de las características geométricas DMU, absorción de agua AAU y finalmente análisis de resistencia mecánica a la compresión RCU para unidades de mampostería que permitan verificar la viabilidad técnica de las muestras.

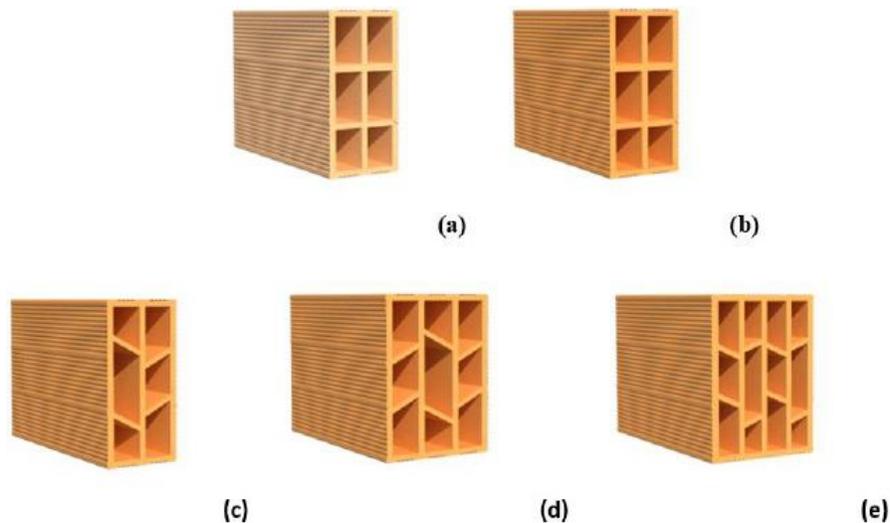


Figura 2. Matriz de análisis (a) H1, (b) H2, (c) C1, (d) C2 y (e) C3.

Fase 1: Método FEM

Procedimiento

Se emplea ingeniería asistida por computador en software ANSYS R16 a partir de modelos elaborados en software SOLIDWORKS 2017 de las unidades constructivas en formato H1, H2, C1, C2 y C3, añadiendo información de los materiales y los parámetros específicos del clima de la ciudad de Cúcuta (Colombia) para valorar el comportamiento térmico por distribución de temperatura y flujo de calor de las piezas. Los datos utilizados consideran una conductividad térmica del aserrín de $0,11 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ [16-17] con una conductividad de la arcilla de $0,407 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ [18], donde, el aserrín funciona como un aditivo formador de poros en el cuerpo de la cerámica que aporta una mejora en los valores de conductividad térmica del material al implementar 5% de polvo de aserrín y 95% de arcilla en la mezcla; los datos ambientales locales son extraídos del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM [19] para el mes de septiembre como la temporada del año que presenta la más alta temperatura en la hora del día con la más alta radiación solar, es decir bajo las condiciones climáticas más extremas.

Datos

Tabla 2. Parámetros para la simulación térmica.

Información de los materiales	
H1	H2 y C1
$k_{M-A} = 0,407 \text{ W / m} \cdot ^\circ\text{C}$	$k_{M-ASS} = 0,3915 \text{ W / m} \cdot ^\circ\text{C}$
Información de las condiciones ambientales	
Temperatura máxima promedio = $33 \text{ }^\circ\text{C}$	
Radiación solar máxima promedio = $796,8 \text{ W} \cdot \text{h/m}^2$	
$Q_{Solar} = 796,8 \text{ W / m}^2$	
Velocidad promedio del viento = 4 m/s	
$\Delta t = 12:00 \text{ horas a } 13:00 \text{ horas} = 1 \text{ hora}$	

Con la velocidad del viento, las condiciones de temperatura y la presión del lugar, se considera un coeficiente de transferencia de calor por convección $h = 17,5154 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ que se aplicará a la sección exterior de la geometría donde tiene efecto la velocidad del viento. Para las superficies que no están encerradas como cámaras de aire internas se asume un coeficiente de transferencia de calor por convección natural de $h = 5 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ [20]. En la Figura 3 se observa que en la cara frontal se aplica la condición exterior de viento y radiación solar, y la convección natural se aplica en la cara interior de los productos.

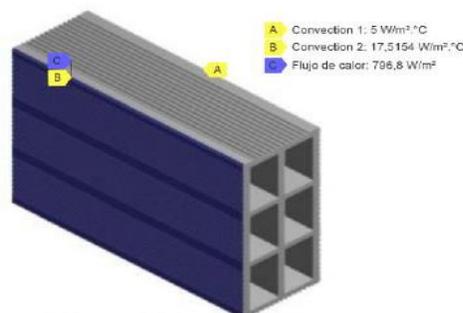


Figura 3. Condiciones aplicadas a los modelos.

Resultados y análisis

En la Figura 4 se muestran los resultados de distribución de temperatura en las piezas, y en la Tabla 3 se presentan los datos obtenidos de temperatura:

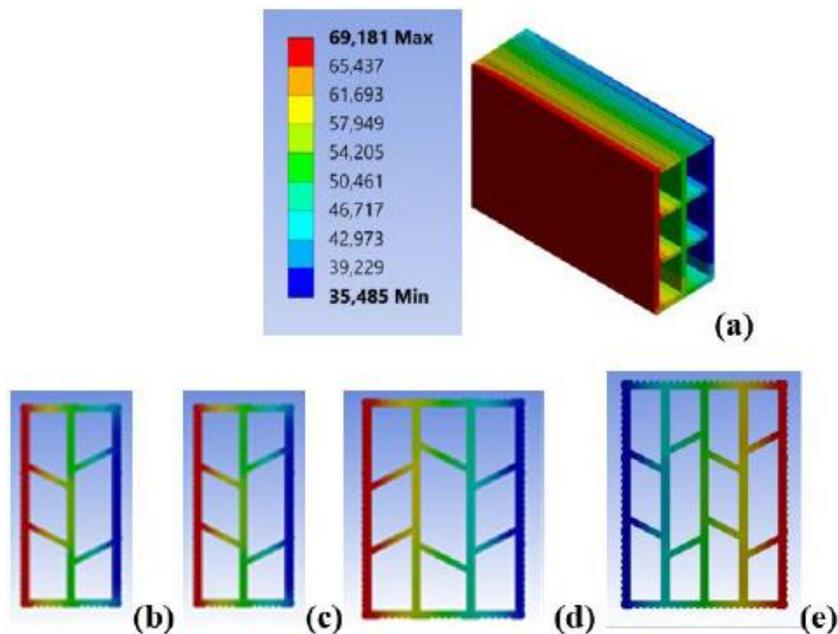


Figura 4. Resultados de distribución de temperatura.

La disminución más significativa en el calor transferido se presenta al comparar H1 con H2 donde se reduce $1,019^{\circ}\text{C}$ la temperatura final de la pieza, y la disminución más alta se presenta en la pieza C3 con una reducción de hasta $1,376^{\circ}\text{C}$ implementando una sinergia entre todas las estrategias, sin embargo, este valor no es significativamente inferior a otras muestras compuestas por M-ASS como C1 que presenta modificaciones en los tabiques o C2 que además implementa un aumento de espesor a 150mm donde se esperaba una mayor influencia sobre la transferencia de calor

Tabla 3. Resultados de temperatura exterior e interior.

Producto	Temperatura Exterior Superficie Inicial ($^{\circ}\text{C}$)	Temperatura Interior Superficie Final ($^{\circ}\text{C}$)	Disminución de temperatura respecto a H1
H1	78,000	35,821	
H2	78,305	34,802	1,019
C1	78,133	34,745	1,076
C2	78,233	34,624	1,197
C3	78,408	34,345	1,376

Los resultados muestran que al aumentar el número de cavidades y por tanto la resistencia total de las piezas con un incremento en las cámaras de aire, paredes y tabiques, 2 en C1, 3 en C2 y 4 en C3, estas estrategias no representa mayores variabilidades en el desempeño térmico final, con diferencias que no superan los 0,3°C. En promedio estas técnicas pasivas aportan una reducción de la conductancia térmica de 1°C en los productos cerámicos estudiados.

Respecto al flujo de calor, en la Figura 5 se presenta el comportamiento de térmico sobre las partes que conforman las unidades constructivas, donde los tabiques funcionan como puentes directos:

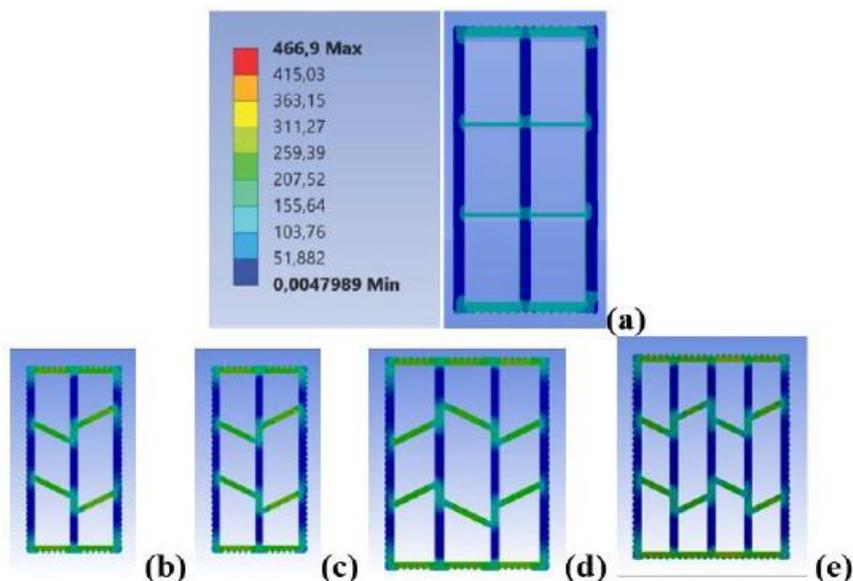


Figura 5. Resultados de flujo de calor, (a) Forma C-1 y (b) Forma C-2.

En los flujos de calor en tabiques las reducciones más significativas se presentan al aplicar recorridos discontinuos a través de formas disipadoras, evidente en (c), (d) y (e) de la Figura 5, donde, C2 y C3 presentan un mejor comportamiento considerando la influencia de las paredes internas y el incremento en en número de tabiques oblicuos sobre los cuales se transfiere el calor; de la misma manera que en los resultados de distribución de temperatura las muestras C1, C2 y C3 no evidencian grandes diferencias entre sí, con un comportamiento promedio de 86,32 W/m² en la concentración de energía como se puede apreciar en la Tabla 4; por su parte H2 no presenta grandes beneficios al conservar tabiques continuos en su morfología interna, sin embargo, los

resultados pueden considerarse positivos tomando en cuenta que H1 presenta un calor de 187,69 W/m² en promedio sobre los tabiques.

Tabla 4. Resultados de flujo de calor.

Producto	Flujo de calor Máximo (W/m ²)	Flujo de calor Mínimo (W/m ²)	Flujo de calor Promedio Tabique (W/m ²)
H1	267,56	29,93	187,69
H2	278,29	0,02	136,89
C1	292,59	0,78	104,26
C2	203,79	0,26	79,40
C3	169,71	0,08	75,324

Fase 2: Método NTC 4017

Procedimiento

En el desarrollo de este estudio se implementa la NTC 4017 para determinar el comportamiento físico-mecánico de prototipos fabricados a escala 1:6 de las piezas H2 y C1 para evaluar la influencia de la porosidad en ambas tipologías, así como, de los puentes térmicos oblicuos de C1, respecto a la factibilidad en el proceso de producción y su resistencia mecánica a la compresión; como punto de referencia se fabrican especímenes de H1 para el análisis comparativo de las muestras.

En su elaboración se utilizan dos boquillas metálicas adaptadas a una extrusora en el Laboratorio de Materiales Cerámicos CIMAC de la Universidad Francisco de Paula Santander, Cúcuta, implementando una composición de arcilla roja extraída del municipio del Zulia (Norte de Santander Colombia) que fue preparada a través de un proceso de triturado y molienda al 100% para H1, y al 95% arcilla en H2 y C1 en mezcla con una concentración de 5% polvo de aserrín resultante de un proceso de secado, triturado, molienda y tamizado; la descripción de los prototipos se realiza en la Tabla 5. Con las pastas se realizó el proceso de extrusión para corte y moldeo de cada pieza, seleccionando 9 especímenes para realizar registro de datos en condiciones de húmedo, seco y finalmente cocido a temperatura de 1000°C.

Tabla 5. Descripción de Prototipo.

H1	Forma	Boquilla Tipo H
	Composición	Mezcla M-A 100% arcilla
H2	Forma	Boquilla Tipo H
	Composición	Mezcla M-ASS 95% arcilla roja y 5% aserrín
C1	Forma	Boquilla Tipo C
	Composición	Mezcla M-ASS 95% arcilla roja y 5% aserrín

Resultados

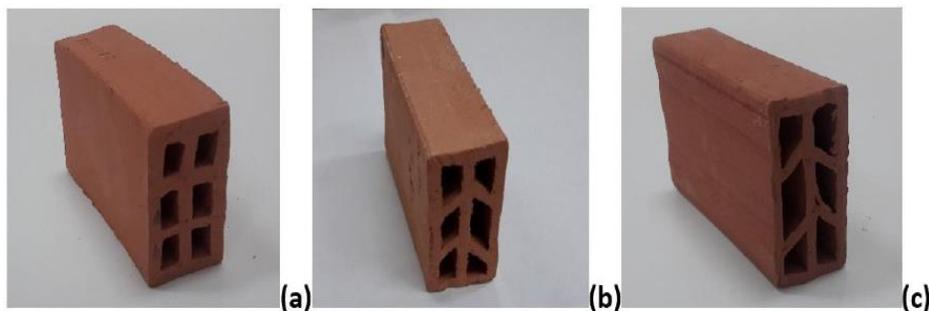


Figura 6. Prototipos fabricados por extruido a nivel de laboratorio, (a) H1, (b) H2 y (c) C1.

Tabla 6. Resultados caracterización físico-mecánica de unidad constructiva.

	Resultados	H1	H2	C1
		M-A	M-ASS	M-ASS
Análisis AFE	Contracción (%)	1,24	1,12	1,17
	Pérdida de masa (%)	5,30	9,054	10,35
	Adsorción Agua (%)	11,50	17,109	18,41
Análisis DMU	L (mm)	68,34	74,82	75,50
	B (mm)	25,52	21,71	22,29
	H (mm)	45,28	45,09	45,44
	Pared (mm)	3,38	3,69	3,67
	Tabique (mm)	3,87	3,58	3,60
	Área de Huecos (mm ²)	44,18	42,02	43,80
	Porcentaje Adsorción Agua (%)	75,17	79,81	80,95
Análisis RCU	Resistencia a la compresión (kgf/cm ²)	8,51	7,06	6,14

La contracción por secado se mantiene en porcentajes constantes en todas las muestras, con un aumento en los porcentajes de pérdida de masa sobre el 9% y absorción de agua por encima del 6% para H2 y C1 asociadas a la porosidad en el cuerpo de la cerámica (Tabla 6), sin que se presentasen deformaciones o roturas en las paredes y tabiques de los especímenes durante el proceso de fabricación (Figura 5). La adición de residuos industriales de la madera en la mezcla se refleja en la resistencia a la compresión de las muestras cocidas evidenciando una disminución de los atributos mecánicos por la acción de la porosidad al utilizar M-ASS y la forma de los tabiques en el cerámico, con valores por debajo de las muestras con M-A, presentando mayor resistencia en H2 que en C1, con una disminución de resistencia del 15% en H2 y del 25% en C1.

Conclusiones

En la evaluación térmica se encontró que la acción de la porosidad al reducir la conductividad de la cerámica permite una disminución de 1.019°C en la temperatura final transferida, evidente en las muestras H1 y H2 que presentan la misma forma física pero diferente composición material; así mismo, si se altera la morfología de los tabiques internos interrumpiendo los puentes térmicos como en C1 es posible lograr una reducción de 1.076°C en la superficie interior, y si altera además el espesor de la pieza con un incremento de 50mm como en C2 y se añade una pared adicional formando un sistema que tiene que atravesar 4 paredes y 4 cámaras de aire como en C3 se logra disminuir 0.3°C adicionales para una temperatura final hasta 1.376°C menos respecto a H1. No obstante, puesto que C2 y C3 no muestran resultados significativamente menores que

C1, no es viable incrementar el espesor y por tanto el peso o costo en la producción de las piezas, en este sentido, es necesario concentrarse en una medida que considere 100mm de espesor y que contenga como en H2 y C1 mejores características como un incremento de la porosidad en el cerámico y geometrías disipadoras en las unidades constructivas.

Si se comparan todas las variables, con estos resultados es posible demostrar que el aserrín presenta una función efectiva como aditivo termoaislante para cerámicos consiguiendo una reducción de 1°C en promedio sobre las temperaturas finales de las superficies internas de sistemas de mampostería, sin embargo, si se consideran los análisis de laboratorio los resultados evidencian que al aplicar M-ASS no se conservan eficientemente las propiedades mecánicas de los productos reduciendo por encima del 15% la resistencia mecánica de las piezas, y si además se implementan geometrías disipadoras puede caer hasta 25% la resistencia a la compresión del mampuesto.

Los datos derivados de esta investigación, no logran grandes alcances respecto al aislamiento térmico para piezas cerámicas de mampostería, pero presentan un punto de partida para el desarrollo de soluciones térmicamente eficientes en climas de alta temperatura como un aporte a la producción de nuevos materiales y nuevos diseños para cerámicos que estructuren un camino hacia soluciones ambientalmente responsables desde el eje de la sostenibilidad energética para la construcción.

Referencias

- [1] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), *Atlas interactivo de Colombia* (Colombia: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales), 2010
- [2] J. Sánchez y P. Ramírez, El clúster de la cerámica del área metropolitana de Cúcuta (San José de Cúcuta: Universidad Francisco de Paula Santander), 2013
- [3] S. Bose and C. Das, "Sawdust: From wood waste to poreformer in the fabrication of ceramic membrane", *Ceramics International*, vol. 41, pp. 4070–4079, 2015. doi: 10.1016/j.ceramint.2014.11.101
- [4] S. Bose and C. Das, "Preparation and characterization of lowcost tubular ceramic support membranes using sawdust as a pore-former", *Materials Letters*, vol. 110, pp. 152–155, 2013. doi: 10.1016/j.matlet.2013.08.019
- [5] G. Cultrone, I. Aurrekoetxea, C. Casado and A. Arizzi, "Sawdust recycling in the production of lightweight bricks: How the amount of additive and the firing temperature influence the physical properties of the bricks", *Construction and Building Materials*, vol. 235, pp.117436, 2020. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117436
- [6] I. Demir, "Effect of organic residues addition on the technological properties of clay bricks", *Waste Management*, vol. 28, pp. 622–627, 2008. doi:10.1016/j.wasman.2007.03.019
- [7] J.L. Vivancos, J. Soto, I. Perez, J. Ros-Lis, and R. Martínez-Mañez, "A new model based on experimental results for the thermal characterization of bricks", *Building and Environment*, vol. 44, no. 5, pp. 1047-1052, 2009
- [8] G. Kanellopoulos, V.G. Koutsomarkos, K.J. Kontoleon K. and Georgiadis-Filikas, "Numerical analysis and modelling of heat transfer processes

- through perforated clay brick masonry walls", *Procedia Environmental Sciences*, Vol. 38, pp. 492-499, 2017
- [9] P. Lourenço, G. Vasconcelos, P. Medeiros, and J. Gouveia, "Vertically perforated clay brick masonry for loadbearing and non-loadbearing masonry walls", *Construction and Building Materials*, Vol. 24, no. 11, pp. 2317-2330, 2010
- [10] M.S. Narváez-Ortega, J. Sánchez-Molina and C.X. Díaz-Fuente, "Comparative evaluation of the physical, mechanical and thermal properties of traditional H10 and H15 red clay blocks manufactured by the ceramic industry from San José de Cúcuta, Colombia", *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1388 012007, 2019
- [11] M.S. Narváez-Ortega, J. Sánchez-Molina y C.X. Díaz-Fuente, "Experimentación comparativa de transferencia de calor por puente térmico a partir de la modificación de la geometría de los tabiques en bloque cerámico H10", *Respuestas*, vol. 25, no. s2, pp. 29-35, 2020
- [12] A. P. Colmenares Uribe, J. Sánchez Molina and C.X. Díaz Fuentes, "Comparative thermal analysis of extruded ceramic products between multi perforated brick and modified bricks in cells distribution", *Journal of Physics Conference Series*, vol. 1386 012130 1, 2020
- [13] J. Kočí, J. Maděra and R. Černý, "A fast computational approach for the determination of thermal properties of hollow bricks in energy-related calculations", *Energy*, vol. 83, pp. 749-755, 2015
- [14] M.C. Juárez, M.P. Morales P. Muñoz and Mendivil, "Influence of horizontal joint on the thermal properties of single-leaf walls with lightweight clay blocks", *Energy and Buildings*, vol. 49, no. 362, 2012
- [15] Normas ICONTEC, Norma Técnica Colombiana, NTC 4017. Método para muestreo y ensayos de unidades de mampostería y otros productos de arcilla, Bogotá: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC), 2005
- [16] J. Díaz Megchún, F. Robles Martínez, M. Macías Hernández and A. Osorio Mirón, "Determinación de la conductividad térmica de materiales para biosecado mediante el método de placa caliente", *Redisa*, pp. 1-6, 2013
- [17] R. Manrique, et al. "Analysis of barriers to the implementation of energy efficiency actions in the production of ceramics in Colombia", *Energy*, vol. 143, pp. 575-584, 2018
- [18] J. Sánchez Molina, D.C. Álvarez Roza y J.F. Gelves Díaz, "Cisco de Café como posible material sustituto de arcilla en la fabricación de materiales cerámicos de construcción en el área metropolitana de Cúcuta", *Respuestas*, vol. 23, no. 1, pp. 27-31, 2018
- [19] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) 2018 *Informe estación Universidad Francisco de Paula Santander, promedio horario de radiación* (Colombia: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales)
- [20] Y.A. Cengel, *Transferencia de calor y masa, un enfoque práctico*. México: McGraw-Hill Interamericana, 2007